

# パラレルメカニズム型加工機の出力運動予測による 工具経路の生成

著者	谷内 宏之, 立矢 宏, 海 寛之, 服部 亮治
雑誌名	日本機械学会論文集C編 = Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu, C Hen / Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C
巻	75
号	752
ページ	1114-1121
発行年	2009-04-01
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2297/19142">http://hdl.handle.net/2297/19142</a>

## パラレルメカニズム型加工機出力運動予測による工具経路の生成\*

谷内 宏史<sup>\*1</sup>, 立矢 宏<sup>\*1</sup>  
海 賢之<sup>\*2</sup>, 服部 亮治<sup>\*2</sup>Tool Path Generation for a Parallel Mechanism Machine Tool  
by Predicting Its Output MotionHiroshi YACHI, Hiroshi YACHIYA<sup>\*1</sup>  
Takayuki UMI and Ryoji HATTORI<sup>\*2</sup><sup>\*1</sup> Graduate School of Natural Science & Technology, Kanazawa University,  
Kakumichi-9, Kanazawa-shi, Ishikawa 920-1192 Japan

This paper makes it possible to predict the output motion of a parallel mechanism and proposes a method for generating a tool path of a machine tool consisting of the parallel mechanism. As a numerically controlled machine tool generally processes a work by interpolating an ideal shape with linear lines, a deviation between a path of tool and the ideal shape can be estimated easily. However, an output motion of the parallel mechanism is nonlinear, and accordingly an output path of the parallel mechanism can be hardly determined by the direct kinematics. A prediction of the deviation of the parallel mechanism machine tool is therefore extremely difficult, so that a generation of its tool path that ensures a given allowance is not easy. Thus the present study proposes a simple method to predict the tool path of the parallel mechanism by approximating its motion with a spiral path. By using a prediction result, the study determines an efficiently optimal cutter location data to realize the tool path that ensures a required deviation.

**Key Words** Robot, Generating Motion, Positioning, Machine Tool, Parallel Mechanism, Tool Path Deviation, Kinematics

## 1. 緒言

NC多軸加工機は被削材の段取り替え無しに複雑な形状の切削が可能で加工工程を大幅に短縮できることから普及が進んでいる。しかし、多軸方向の加工を行うために質量の大きな主軸台または被削材を固定するテーブルを並進・回転させる構造であることが加工の高速化、省エネルギー化を妨げている。これらの解決策として多自由度機構であるパラレルメカニズムを多軸加工機へ応用することが検討されている<sup>①②</sup>。パラレルメカニズムはアクチュエータをベース近傍に配置するため可動部の質量が小さく低駆動力で高速な運動が可能である。また、産業用ロボットに多く用いられているシリアルメカニズムに比べれば、剛性が高く、高精度に位置決めが行える。さらに、同機構は逆運動学を解くことが易しく、機構の位置・姿勢が与えられれば入力変位も容易に決定できる。しかし、加工機として用いる場合、目標とする形状を切削するための工具の移動経路の決定において従来の多軸加工機に比べ困難な問題を有する。

本論文では加工時における工具先端中心の運動軌跡

を工具経路、また、設計形状の輪郭に沿った軌跡を理想経路と記す。NC多軸加工機では、通常、図1に示すように理想経路である設計形状の輪郭を離散化した分割点で表し、各分割点間を直線補間して工具経路とする<sup>③</sup>。従来のNC加工機は、加工に用いる直線軸の方向と加工機の各軸運動の運動方向が1対1に対応しており、それぞれの運動方向への入力力関係も線形である。また、工具の姿勢を固定させない任意方向への並進運動に関して生じる、モータの分解能に起因する低周波は理論上1 $\mu$ m程度ではほぼ直線と見なせる<sup>④</sup>。したがって、従来のNC加工機では理想経路に対する直線補間部分の偏差を図1に示すように見積もることができ、理想経路と工具経路の最大偏差が許容値に収まるように各分割点の幅を決定することは容易である。また、工具の姿勢変化をとらなう場合であっても、入力軸の変位

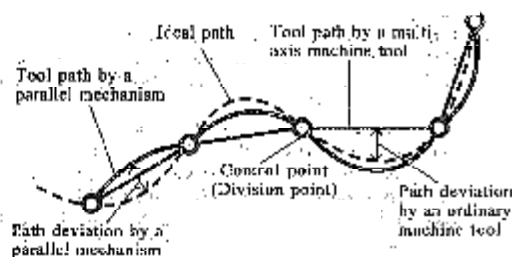


Fig. 1 Path deviation

\* 原稿受理: 2008年10月16日

<sup>\*1</sup> 正員、金沢大学大学院自然科学研究科(〒920-1192)金沢市白川町<sup>\*2</sup> 金沢大学大学院自然科学研究科

E-mail: umi@ipc.kanazawa-u.ac.jp

から出力軸である工具の位置・姿勢が容易に解析できるため、ジニアライゼーション原理によって直線からの偏差を抑制する方法も提案されている<sup>10)11)</sup>。

これに対してパラレルメカニズムは、いずれの軸方向への運動も基本的には全ての入力軸の変位を同量に制御することで行われ、また、入出力関係も非線形である。さらに、通常の多軸加工機やシリアルメカニズムと異なり、入力軸の変位から出力軸の位置・姿勢を求めることが困難である。したがって、工具経路の通過点として指定した各分割点間において、パラレルメカニズムの各軸の運動を同時に開始・終了させる通常のNC加工機と同様な制御を用いる場合<sup>12)</sup>、出力軸の運動方向が複雑に変化するため、分割点間の移動経路は図1に示すように予測が困難な複雑な曲線となり、設計形状に対する偏差を容易に見積もれない。

パラレルメカニズムを用いた加工機で加工形状の精度を確保する方法として設計形状をできるかぎり微分化し工具経路を与えることが考えられるが、偏差が必ずしも許容値内になるとは限らず、反対に過度な仕上がりになることもある。また、場合によってはNCデータが膨大となり転送の遅れが生じパラレルメカニズム型加工機の利点である速度を低下させてしまう恐れもある。厳密に保証する方法としては、出力軸の位置・姿勢を順運動学解析で予測し、設計形状との差が許容値となる分割点を求める方法が考えられるが、パラレルメカニズムの順運動学解析は複雑な繰返し計算を必要とし、計算量が膨大となり実用的でない。

以上のようにパラレルメカニズムを用いた加工機は、通常の多軸加工機に比べ工具経路の生成が困難であり、現在のところ有効な方法は提案されていない。そこで、本論文では加工機に用いることを前提としたパラレルメカニズムの出力軸の運動経路を順運動学を用いずに簡便に予測する方法を提案し、同手法により目標とす

る加工物の輪郭に関するデータから幾何学的な偏差が許容値内となる工具経路を生成する方法を示す。

## 2. 運動経路の予測と工具経路の生成

2-1 出力軸の運動経路の予測法 NC加工機の制御では工具の位置決め目標となるデータの集合を工具経路データ(CLデータ)として与える。CLデータは、図1に示すように設計形状の輪郭にそって分割した各点での工具の先端位置および姿勢の指令値を表す。工具の位置・姿勢決めのための指令が与えられた分割点を以後、制御点と呼ぶ。

制御点における入力変位の指令値は、工具の位置姿勢より決定し与えるが、制御点間においては同点間に必要な入力変位を分割し指令値とする。神谷で述べたようにパラレルメカニズムでは入力変位から出力軸である工具の位置・姿勢を求めることは困難であり、設計形状である理想経路と実際に工具が通過する経路との偏差が予測できない。

そこで、本論文では工具先端であるパラレルメカニズムの出力軸の制御点間の経路をらせん運動として近似する方法を提案する。また、同手法を用いて理想経路と工具経路の最大偏差が許容値以下となるCLデータの生成法を述べ、その有効性を示す。

経路の予測法について図2を用い説明する。図2中の点A, Bは隣接する制御点であり、同点間の工具先端の軌跡の近似方法は以下のとおりである。

I. 点A, Bでの工具先端速度 $S_A, S_B$ をそれぞれ求める。なお、工具先端速度 $S$ は各運動部の入力変位比を表す行列 $L$ を与え、機構の瞬間的な入力関係を表すヤコビ行列 $J$ を用い次式より求める。

$$S = JE \quad (1)$$

II.  $S_A, S_B$ を法線とし、点A, Bをそれぞれ含む平面 $\Pi$ および $\Pi'$ の交線かららせん運動の回転軸とする。ただし、両平面が平行な場合、回転軸 $I$ を決定することができないため、工具経路を線分ABの中点を回転中心とする円弧とする。

III. 点A, Bからそれぞれ回転軸 $I$ に垂線をおろし、各交点を $H_A, H_B$ 、各垂線の長さを $r_A, r_B$ とする。工具先端は点Aから点Bに向かい回転半径を $r_A$ から $r_B$ に、回転中心を $H_A$ から $H_B$ に変化させながら移動するとして近似する。

IV. 回転運動に関して工具先端は点Aから点Bまで等加速度運動するとして近似する。点A, Bにおける角速度 $\omega_A, \omega_B$ および同点間の角加速度 $\alpha$ は次式となる。

$$\omega_A = S_A / r_A, \quad \omega_B = S_B / r_B \quad (2)$$

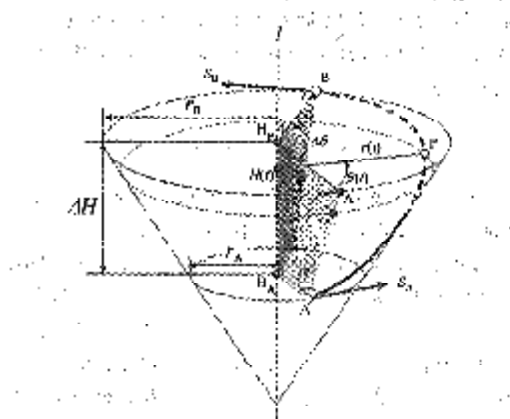


Fig. 2 Approximation by spiral motion

$$\dot{\theta} = \frac{|\dot{\theta}_x|^2 + |\dot{\theta}_y|^2}{2\Delta\theta} \quad (3)$$

なお、図2に示すように $\Delta\theta$ は単位 $t$ を法線とし、半径を $r_0$ とする円の外周が平面 $W$ と交わる点を $A'$ として、円内で点 $B$ と $H_0$ を結ぶ線が点 $A'$ と $H_0$ を結ぶ線となす角に等しい。したがって、点 $A$ から $B$ にいたる時間 $\Delta t_{AB}$ は次式より得られる。

$$\Delta t_{AB} = \frac{\omega_0 - \omega_1}{\dot{\omega}} \quad (4)$$

さらに、回転半径および回転中心も $\Delta t_{AB}$ の間で等速に変化するとし、それぞれの速度 $\dot{r}$ および $\dot{r}_0$ を次式で決定する。

$$\dot{r} = \frac{|\dot{r}_x| + |\dot{r}_y|}{\Delta t_{AB}} \quad (5)$$

$$\dot{H} = \frac{\Delta H}{\Delta t_{AB}} \quad (6)$$

V. 以上の結果より工具先端の座標 $P(t)$ を次式で表す。

$$P(t) = (H(t), r(t), \theta(t)) \quad (7)$$

ただし

$$\theta(t) = \omega_0 t + \frac{1}{2} \dot{\omega} t^2, \quad r(t) = r_0 + \dot{r} t, \quad H(t) = H_0 + \dot{H} t \quad (8)$$

変数 $t$ は制御点 $A, B$ 間の分割数を $N$ とし次式で得る。

$$t = \Delta t_{AB} \cdot \frac{i}{N} \quad (i=0 \sim N, N \in \mathbb{N}) \quad (9)$$

本論文では式(7)で表される経路を工具経路の予測値とし、以下、予測経路と記す。なお、工具経路を近似的に表す方法として直線や曲線を用い、それらを高次多項式、自由曲線などで表すことも考えられるが、本論文では以上のようにパラレルメカニズムの運動を主な変数として容易に滑らかな曲線を表せることから、らせん運動を用いた。ただし、以上の近似方法では、点 $A, B$ で出力軸に回転軸方向、半径方向速度を仮定するため、両点では実際の工具先端速度と一致しない。この影響を検討するため、制御点において実際の工具先端速度と、らせん運動の速度が一致するように $\dot{\theta}$ および半径方向の速度を等速でなく、三角形状で与え近似を行ったが、以上の結果との差は無視できる程度であった。そこで、本論文では簡単のため、式(5)および式(6)を用いる。

2.2 CLデータの生成法。偏差を許容値内とするCLデータの生成法を図3を用いて説明する。まず、理想経路上に一定間隔で制御点を設定する。制御点の間

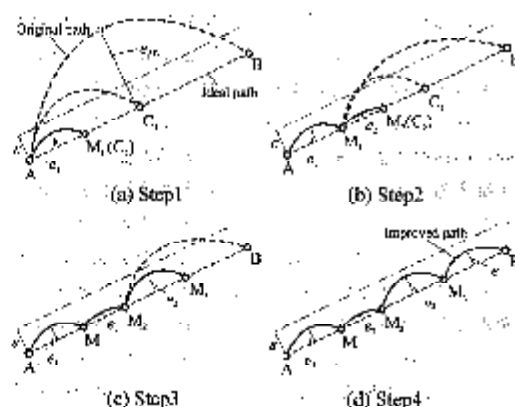


Fig. 3 Method of the interpolation between the control points

隔は予測経路の近似精度に影響するが、その検討は次節で述べる。

次に各制御点間の工具経路を前節の方法で近似して理想経路との偏差の最大値を求め許容値 $e$ と比較する。図3に制御点を $A, B$ として例を示す。AB間の最大偏差 $e_{AB}$ が $e$ より大きい場合、図3(a)のように理想経路ABを2分割する点 $C_1$ を新たな制御点とする。さらに、AC<sub>1</sub>間で最大偏差 $e_1$ を求め許容値 $e$ と比較して、 $e_1$ が $e$ 以下であれば点 $C_1$ を制御点の中間位置 $M_1$ とする。また、 $e_1$ が $e$ より大きければ、AC<sub>1</sub>間を再度2分割した点を新たな点 $C_2$ として以上の操作を繰り返す。補間位置の決定までに $n$ 回2分割したとすると、補間点 $M_i$ は、制御点 $A$ から $B$ までの位置・姿勢変化量を2分割した値に点 $A$ での位置・姿勢を加え指定される制御点となる。

次に、 $M_1B$ 間で工具経路を予測し理想経路との最大偏差 $e_2$ を算出し、図3(b)に示すように先程と同様の操作を行い中間位置を求め制御点 $M_2$ を決定する。以降、図3(c), (d)に示すように経路偏差の予測と制御点の補間を繰り返す。点AB間の制御点数 $n$ と片幅を決定する。さらに、以上の操作を全経路について行い工具経路を生成する。

### 3. 予測精度の検討

3.1 対象機構。前章で述べた工具経路の予測法は経路上の2点の工具先端速度から同点での工具先端の軌跡を予測するため、最初に設定する2点間の距離は予測精度に大きく影響する。そこで、図4に示すハイブリッドパラレルメカニズム<sup>10)</sup>を対象に本予測法の精度を検討する。同機構は図5に示す空間3自由度パラレルメカニズムと平面XYテーブルを組み合わせた機構である。空間3自由度パラレルメカニズムは、直交する2軸周りの回転およびZ軸方向の並進運動を生成

する。また、平面案内テーブルはXおよびY軸方向の並進運動を創成する。したがって、同機構は全体として5自由度となり、汎用的な5軸の工作機械と同等な加工が可能である。パラレルメカニズムの各連組の構造は同一であり、ベース側から1自由度回転対偶、1自由度並進対偶、3自由度球対偶で構成され、球対偶が出力節と連結される。同機構は一边が100mm以下の立方体を加工可能となるように設計した。その主要な機構寸法、作業領域を表1に、ベースおよび出力節上の対偶の配置を図5に示す。図5においてO-XYZはベースの中心に固定した絶対座標系 $\Sigma_0$ 、 $P-x_p y_p z_p$ は出力節の中心に設定した動座標系 $\Sigma_p$ である。

工具は、図4に示すとおり点Pの位置にXYテーブルに向かう鉛直方向に取り付け、パラレルメカニズムを駆動し、2軸方向の位置、直交する2軸回りの姿勢を決する。工具の姿勢は図6に示す $\theta_1, \theta_2$ の各軸周りの回転角 $\theta_1, \theta_2$ で表す。 $\theta_1$ は $x_p y_p$ 平面内における回転軸の方向を表し、 $\theta_2$ は同回転軸周りの回転変位を表す。

なお、図5のパラレルメカニズムは空間機構であるため、以上の位置・姿勢決め時に、XY軸方向へ微量的

な並進変位を生じる。同変位に関してはXYテーブルの位置決めで補正する。工具先端の経路はXYテーブル上に設置された被加工物に対する工具経路として評価するため、工具先端 $C_p$ の位置は、図4に示すように $W-x_p y_p z_p$ で示すXYテーブル上に設定した動座標系 $\Sigma_w$ で表す。なお、初期状態において、 $\Sigma_0, \Sigma_p, \Sigma_w$ の各軸方向も $\Sigma_0$ の原点のXYZ座標系と一致させ、また、出力節がベースと平行となる場合に $\theta_2$ を零とする。

3・2 制御点間距離と予測精度 2章の方法で得られる予測経路と、順運動学解析より得られる工具経路との差を求めることで、提案する経路予測法の精度を評価する。なお、順運動学解析で得る工具経路を以後、実経路と記す。予測経路の差は、図7に示すように、制御点間における、それぞれの経路上の対応する複数の点間の距離の最大値とする。対応する点を厳密に定義することは難しいが、本論文では以下のように定める。

実経路上の点は、隣接する制御点間の入力変位 $L$ を等分割した各変位に対する工具先端の位置とする。予測経路上の点は、式(9)に示す、工具先端が隣接する

Table 1 Specifications of the parallel mechanism

Workspace [mm]	$-50 \leq x_p \leq 50, -50 \leq y_p \leq 50, 10 \leq z_p \leq 110$ (100×100×200)
$R_m$ [mm]	338
$R_{ext}$ [mm]	316

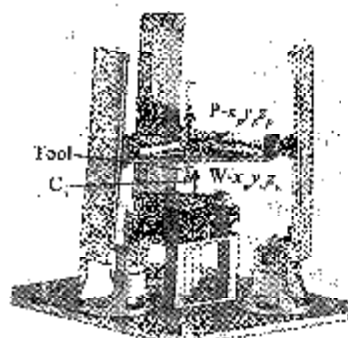


Fig. 4 Hybrid parallel mechanism

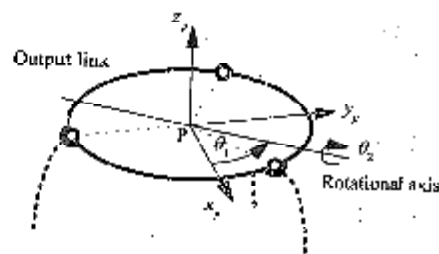


Fig. 6 Expression of the posture

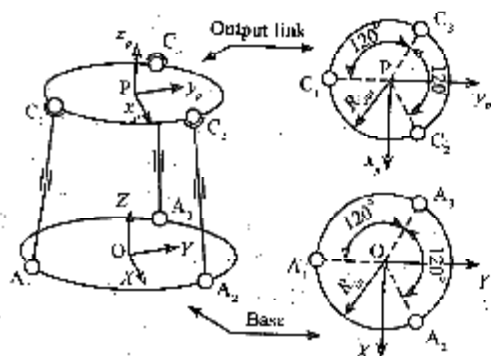


Fig. 5 3dof spatial parallel mechanism

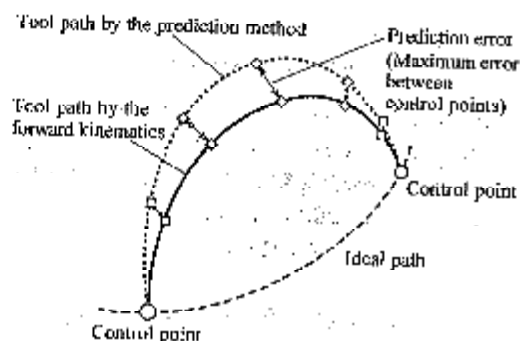


Fig. 7 Prediction error

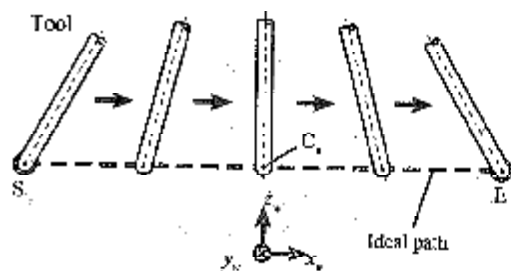


Fig. 8 Target path

Table 2 Target path

	$x_p$ [mm]	$y_p$ [mm]	$z_p$ [mm]	$\theta_1$ [deg]	$\theta_2$ [deg]
S	-50	0	100	90	15
E	50	0	100	90	-15

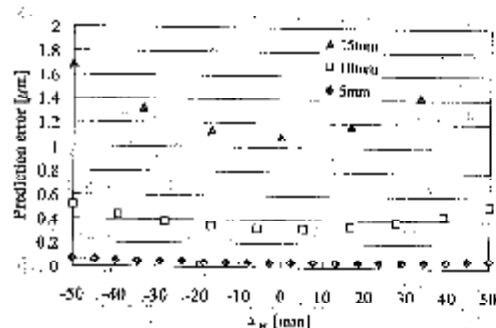


Fig. 9 Prediction error of the tool path

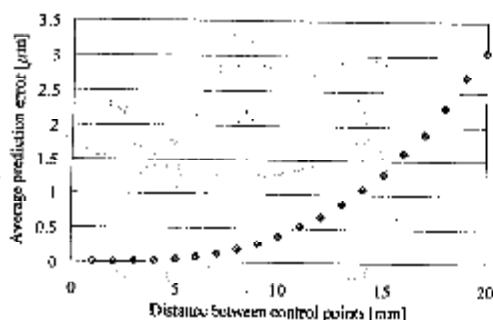


Fig. 10 Relation of the prediction error to distance between control points

制御点を移動するための時間  $\Delta t_{\text{sp}}$  を等分した、各時間における工具先端の位置とする。なお、理想経路および予測経路の分型数は等しくする。以上で決定した分割点どうしの距離を、制御点の一方から他方に向かい順に求め、その最大値を制御点間の経路予測誤差とする。

例として図8に示すように工具先端位置を  $x_p$  上の  $x_p$  軸に沿って高さを一定に保ちながら変化させる経路で経路予測誤差を求める。表2に同経路の始点Sおよび終

点Eの工具位置・姿勢を示す。理想経路はSE間を結ぶ直線とする。SE間に与える制御点間隔を変化させ、各点間の工具経路の順運動学による理想経路と標案手法による予測経路を比較し経路予測誤差を評価する。

図9に制御点間隔を5mm, 10mm, 15mmとし求めた、制御点間の経路予測誤差を示す。経路予測誤差は工具先端位置とともに変化した。また、制御点間隔とともに誤差が減少する。図10に制御点間隔を1~20mmまで変化させたときの経路予測誤差を示す。批判は、評価を行った各経路において始点から終点までの制御点間で求めた経路予測誤差の平均値である。制御点間隔が細かくなるにつれ、経路予測誤差は指数的に減少する。対象としたパラレルメカニズムでは10mm間隔で制御点を与えれば1μm以下の精度で経路を予測することが可能である。

なお、詳細は略すが本予測法が他のパラレルメカニズムにも適用可能であることを確認するために、加工機用のパラレルメカニズムとして代表的な6自由度空間機構であるスチュワートプラットフォーム<sup>(9)</sup>に関して同じく経路予測誤差を求めた。機構の大きさは市販されている加工機の寸法<sup>(9)(10)</sup>を参考にベースおよび出力節の半径を800mmおよび200mm、作業領域を400mm立方とした。その結果、制御点間隔20mmに対し経路予測誤差1μm, 15mmに対し0.4μm, 10mmに対し0.1μmの誤差となり、サブミクロンの精度で工具経路が予測でき、本予測法が他の形式の機構にも応用されることを確認した。

3.3 運動特性と予測精度の関係 図9に示すように本予測法の精度は制御点の間隔だけでなく、機構の位置・姿勢にも影響され、特に、機構の出力が急激に変化する条件では精度が悪化すると認識される。そこで、空間3自由度パラレルメカニズムの運動特性を表す評価値と予測精度の関係について検討する。

空間3自由度パラレルメカニズムの運動特性の評価には機構の圧力角に相当する運動伝達指数を用いる。パラレルメカニズムの運動伝達指数としては式(1)により  $TI$  が提案されている<sup>(11)</sup>。  $TI$  は出力節上の対偶が運動より受ける駆動力と同対偶の運動方向の余弦より求めるが、図5の機構では出力節上の対偶が運動より駆動力だけでなく幾何学的な拘束力を受けるため  $TI$  は用いられない。そこで、ここでは先に著者が提案し、その有用性を確認した  $TI^*$  を用いる<sup>(12)</sup>。  $TI^*$  は、図5の機構では、各運動対偶の発生力の方向と、それぞれで直進対偶に連結する運動対偶の速度の方向との余弦を比較し、それらの最小値として得る。  $TI^*$  の値が増加すれば駆動部分と出力節の運動方向が互いに近づき出力関係が良好になる。

$IT$ と経路予測誤差との関係を、作業領域内の制御点  $P(x_p, \theta_1, \theta_2)$  から、工具姿勢を変えながら製作させた制御点  $Q(x_p + \Delta x_p, \theta_1 + \Delta \theta_1, \theta_2 + \Delta \theta_2)$  までの経路で検討する。点  $P$  での位置・姿勢は表3に示す範囲で、各値をそれぞれの誤み幅で変化させ、それら全ての組合せを検討した。点  $Q$  への工具並進量  $\Delta x_p$  は  $\pm 5\text{mm}$  とし、姿勢変化量が  $1^\circ$  となるように  $\Delta \theta_1$  あるいは  $\Delta \theta_2$  を変化させた。

図11に点  $P$  での機構の  $IT$  と点  $PQ$  間の経路予測精度との関係を示す。 $IT$  の増加とともに経路予測精度も向上する傾向があり、運動特性が良好になるにつれ、提案する経路予測法の精度向上も期待できることがわかる。

なお、以上のような関係となる理由を検討するため、図5の機構において  $IT$  と入出力変位との関係を調べたところ、 $IT$  の減少とともに入力に対する出力変位の比が増加していくことを確認した。すなわち、運動特性の低下とともに、入力に対する出力の変化が急となるため、経路予測誤差が増大したと考えられる。

#### 4. 工具経路の生成

4-1 シミュレーションでの検討 表2に条件を  
図8に概略を示す直線を理想経路とし、シミュレー

Table 3 Analysis range

	Range	Step
$x_p$ [mm]	10~210	5
$\theta_1$ [deg]	0~180	5
$\theta_2$ [deg]	-20~20	1

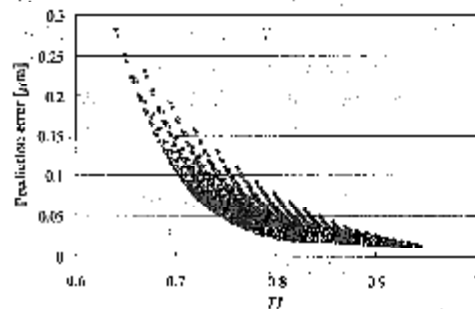


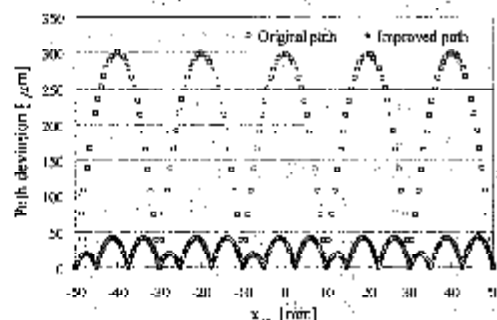
Fig. 11 Relation of prediction error to  $IT$

Table 4 Comparing the forward kinematics to the path prediction

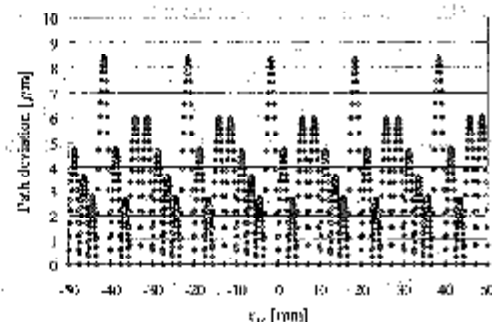
Tolerance	Number of Control points	Maximum path deviation [ $\mu\text{m}$ ]	Calculation time [s]	
			Path prediction	Forward kinematics
(Original)	6	300		
$50\mu\text{m}$	16	42.4	0.065	0.284
$30\mu\text{m}$	21	23.9	0.080	0.409
$10\mu\text{m}$	41	8.43	0.206	1.112
$1\mu\text{m}$	121	0.991	0.893	5.081

ションで工具経路生成法の妥当性を確認する。初期の工具経路におけるSE間の制御点間隔を20mmとし、2-2節で述べた方法により、理想経路と工具経路の偏差の許容値を50、30、10および1 $\mu\text{m}$ として補間を行った。初期および補間し得られた工具経路と理想経路との偏差を順運動学解析よりそれぞれ求め図12、表4に示す。図12(a)に初期の工具経路および偏差の許容値を50 $\mu\text{m}$ とした場合の偏差を横軸を工具先端の $x_p$  軸方向変位として、しおよび◆で示す。同様に図12(b)に偏差の許容値を10 $\mu\text{m}$ とした場合の結果を示す。表4には偏差の許容値を上記の値とした場合に補間された制御点の数、偏差の最大値を示す。

図13および表4より、経路予測法による制御点の補間により、補間前は300 $\mu\text{m}$ 程度あった経路偏差が、補間後はいずれも許容値程度となり、また、その最大値



(a) Tolerance : 50 $\mu\text{m}$



(b) Tolerance : 10 $\mu\text{m}$

Fig. 12 Path deviation

は許容値を超えていない。すなわち、提案する経路生成法は経路偏差を許容値近傍とし、また、制御点数の増加も抑えることができる。

4.2 他の経路生成法との比較 制御点間の工具経路を提案する予測法でなく順運動学を用いて解析し求め、2.2節で述べた方法で経路生成を行い、以上の結果と比較する。表4の結果の右欄に4.1節で述べた理想経路に対し、提案する予測法および順運動学解析を用いて工具経路生成を行った場合に要した計算時間を示した。なお、計算機にはCPUはPentium4(3.0GHz)、1GBのメモリを有するコンピュータを用い、プログラムにはMicrosoft Visual Basic 6.0を使用した。

順運動学解析を用いた場合であっても制御点数の数、最大偏差は経路予測法を用いた場合と同じであった。表4より計算時間を比較すれば、経路予測法を用いた工具経路生成は、順運動学を用いた場合の約1/5程度である。また、3.2節で述べたスチュワートプラットフォームを用いた加工機に対しても同様な比較を行った。詳細は略すが理想経路を400mmの直線、山方幅の姿勢変化を $40^\circ$ 、初期の工具経路の制御点間隔を10mm、偏差の許容値を $1\mu\text{m}$ として工具経路を生成した結果、順運動学解析を用いた場合は6.30秒、経路予測法による場合は0.33秒となり、順運動学解析よりも約20倍高速化が図れた。また、6自由度機構のスチュワートプラットフォームにおいては、経路予測法による工具経路生成は、順運動学解析による場合の約1/20程度となった。

今回のシミュレーションは100mm程度の短い経路を対象としたが、機械部品を加工するような長い経路では膨大な時間を必要とする。したがって、提案する経路予測法を用いて工具経路生成を行えば大幅に計算時間を短縮でき、結果として加工工程の高速化が図れる。

### 5. 工具経路の生成と実験

前節のシミュレーションで、許容偏差を $30\mu\text{m}$ として生成した図8に概略を示す直線経路に対するCIデータを用いて実験による加工実験を行った。工具はボール

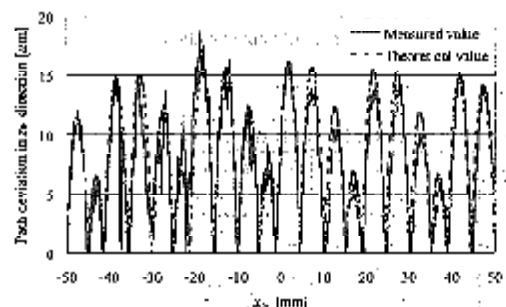


Fig. 13 Experimental results.

エンドミル、被削材にはマシナブルワックスを用いた。加工後、2次元レーザ位置センサ(アイコンスLJ-U)をパラレルメカニズムの工具取付位置に装着し、材を固定したXYテーブルを移動させながら、表面傾方向の傾斜度を測定した。得られた傾斜値には構の位置決めの誤差の影響により、全体的に始点か点に向かって直線的に傾斜が生じた。本論文では決め誤差ではなく経路偏差を対象とするため、測った工具経路の制御点間を直線で結び、同直線な偏差を算出した。なお、工具経路は3次元的な偏許容値となるように生成しているが、 $z$ 軸方向に傾斜度の測定は困難で、また、それらの方向への量は小さいと予想されるため、偏差の評価は $z$ 軸のみで行った。

得られた偏差の測定値を $z$ 軸方向の偏差の理論とともに図13に示す。測定値は理論値とよく一致し、偏差の最大値は約 $18\mu\text{m}$ となっている。実際の切削時には工具の変形、熱の影響などによる偏差を考慮する必要があると予想されるが、提案する手法より、偏差を許容値とする基本的な工具経路の生成可能である。

### 6. 結 言

本論文で得られた結果を以下に要約する。

- (1)加工機に用いることを前提としたパラレルメカニズムの出力軸の近接する2点間の運動経路を、2点の速度らせん運動として傾斜に精度よく近似する方法を示す。
- (2)運動経路の予測方法を用いて、加工時における理論と工具経路の偏差を許容値内とする適切な制御点決定し、工具経路を生成する方法を示した。また、する工具経路生成法を用いれば、順運動学解析を用場合に対して大幅に計算時間を短縮できることをシミュレーションで示した。
- (3)提案する手法により生成した工具経路のデータを用いて試作機により切削を行い、偏差を測定した。その測定値にはば一致する結果が得られ、同手法の妥当確認された。

### 謝 辞

本研究は科学研究費補助金基盤研究(B)(2)(No.15366)の課題の一部として行われた。記して謝意を表する。

### 文 献

- (1) Kakino, Y., Expectations of Machines using Parallel Mechanism, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol.63, No.12(1997), pp.1643-1645.
- (2) Shibukawa, T., Toyama, T. and Hattori, K., Parallel Mechanism based Milling Machine, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol.63, No.12(1997), pp.1671-



- (3) Nakagawa, M., Current and future of parallel link based machine tool, *Tool Engineer*, Vol. 45, No.4 (2001), pp.16-19.
- (4) Nakagawa, M., Parallel link based machine tool and its base technologies, *Tool Engineer*, Vol. 46, No.1 (2002), pp.19-24.
- (5) Mori, E. and Iwabuchi, U., Parallel Mechanism Drilling Machine(three-degree-of-freedom), *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol.63, No.12(1997), pp. 1677-1670.
- (6) Takahashi, S., Morishige, K. and Takeuchi, Y., NC Data Generation for Five-axis Control Matching Using Curves Interpolation-Application of Five-dimensional Non-uniform B-spline Curve-, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol.65, No.12(1999), pp. 1740-1744.
- (7) Hagiwara, Y., Handy Book Mechanics, (2007), Ohtsuma, Ltd., p.393.
- (8) Takeuchi, Y. and Watanabe, T., Study on Post-processor for 5-Axis Control Machining Centers, *Journal of The Japan Society for Precision Engineering*, Vol.58, No.9(1992), pp. 128-134.
- (9) Nagasaka, M., and Takeuchi, Y., Generalized Post-Processor for 5-Axis Control Machining Based on Forth Shape Function, *Journal of The Japan Society for Precision Engineering*, Vol. 62, No. 11(1996), pp. 1607-1611.
- (10) Tachiya, et al., Evaluation of Output Errors of Multiple Degree-of-Freedom Mechanisms to the Forces in Arbitrary Direction (Proposal of an Evaluation Method and Improvement of Rigidity of a Spatial 3-Dof Parallel Mechanism), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 71, No. 701(2005), pp. 214-220.
- (11) Takeda, Y. and Funabashi, H., Motion Transmissibility in Parallel Manipulators, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 59, No. 566(1993), pp.1142-1147.
- (12) Tachiya, et al., A 6-D.O.F. Hybrid Mechanism Composed of Different Parallel Mechanisms, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 64, No. 627(1998), pp. 4353-4360.